

## УПРАВЛЕНИЕ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ

**Д.В. Дикий, В.П. Акимов, А.А. Сочава, А.С. Черепанов**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе исследуются специфические свойства волноводно-щелевого фазовращателя, который предлагается использовать в качестве управляемого ответвителя в распределительных устройствах фазированных антенных решеток с последовательным питанием и управлением  $p-i-n$ -диодами. Рассмотрены характеристики волны, прошедшей через волновод, и их зависимости от положения и размеров щели, прорезанной в широкой стенке волновода. Показано, что путем изменения положения щели в продольном направлении в окне связи волноводов, а также путем перемещения ее зеркально относительно осевой линии волновода, удастся получить изменение фазового сдвига в 360 град. Исследования проведены методом компьютерного моделирования, а также экспериментально. Экспериментальные данные подтвердили результаты моделирования. Предложенный фазовращатель можно также использовать в распределительных устройствах в фазированных антенных решетках с фиксированным положением луча.

**Ключевые слова:** антенна; фазированная антенная решетка; фазовращатель; щель в волноводе; управляемый ответвитель

**Ссылка при цитировании:** Дикий Д.В., Акимов В.П., Сочава А.А., Черепанов А.С. Управление фазовым сдвигом с помощью волноводно-щелевого фазовращателя // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 130 – 138. DOI: 10.18721/JPM.11212

## PHASE SHIFT CONTROL USING WAVEGUIDE-SLOT PHASE SHIFTER

**D.V. Dikiy, V.P. Akimov, A.A. Sochava, A.S. Cherepanov**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Some specific electrical properties of a waveguide-slot phase shifter have been studied in the paper. We propose to use waveguide-slot phase shifter as a controlled coupler in the switchgears of phased arrays with series feeding and  $p-i-n$ -diodes control. The characteristics of the waves transmitted through the waveguide and their dependences on the slot's position and dimensions were considered. The slot of special form was cut through the waveguide wide wall. We succeeded in obtaining the phase shift up to 360 degrees by the lengthwise variation in the slot's position in a coupling window and by the slot's displacement specularly relative to the waveguide's axis line. The study of the problem was conducted experimentally and by simulation technique. The simulation results were verified by experimental data. The proposed phase-shifter can be also used in switchgears of phased arrays with a locked beam.

**Key words:** waveguide; slot in waveguide; antenna; phased array; phase shifter

**Citation:** D.V. Dikiy, V.P. Akimov, A.A. Sochava, A.S. Cherepanov, Phase shift control using waveguide-slot phase shifter, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (2) (2018) 130 – 138. DOI: 10.18721/JPM.11212

### Введение

В последнее время все большее распространение в качестве антенн радиолокаторов различных диапазонов и применений получают фазированные антенные решетки (ФАР). Одним из вариантов построения ФАР являются решетки с последовательным питанием. Примером таких антенн могут служить ФАР, предложенные в работах [1 – 7]. Любая ФАР включает распределительное устройство, которое обеспечивает питание излучателей с нужной фазой и амплитудой.

В большинстве случаев для управления элементами ФАР используют фазовращатели с индивидуальной схемой

управления каждого элемента. ФАР с последовательным питанием использует ферритовый фазовращатель для формирования амплитудно-фазового распределения поля излучательных элементов. Схема управления ферритовым фазовращателем, как правило, громоздка и энергоемка [6, 8 – 10], что ограничивает область применения подобных устройств.

В данной работе исследуются характеристики волноводно-щелевого фазовращателя, который одновременно можно использовать в качестве управляемого ответвителя в распределительных устройствах ФАР с последовательным питанием и управлением  $p-i-n$ -диодами.

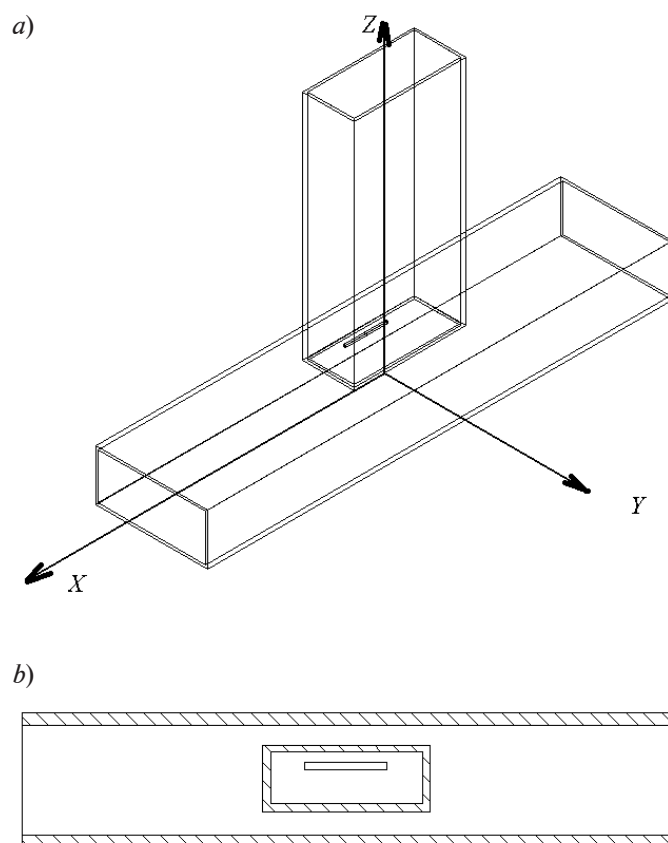


Рис. 1. Схематическое изображение волноводно-щелевого фазовращателя:  
 а – общий вид, б – сечение в плоскости  $xy$  (плоскость контакта волноводов)

### Конструкция фазовращателя и принцип его действия

Конструкция волноводно-щелевого фазовращателя приведена на рис. 1. Два волновода связаны продольной щелью, аналогичной той, которая используется в качестве излучателя волноводно-щелевой решетки.

Предлагаемая в данной работе идея заключается в том, что изменение расположения щели позволяет управлять фазовым сдвигом электромагнитного поля. Если менять продольное расположение щели, то меняется фаза поля. При перемещении щели в другую сторону от осевой линии до-

стигается дополнительный сдвиг фаз на 180 град. Если же отстроить щель от резонанса, то появляется возможность получить дополнительный фазовый сдвиг. Щели формируются включением или выключением  $p-i-n$ -диодов.

Таким образом, мы получаем возможность электрического управления фазой ответвляемого электромагнитного поля.

### Результаты моделирования

В этом разделе приводятся результаты моделирования волноводно-щелевого фазовращателя. На рис. 2, *a* приведены графики частотных зависимостей коэффици-

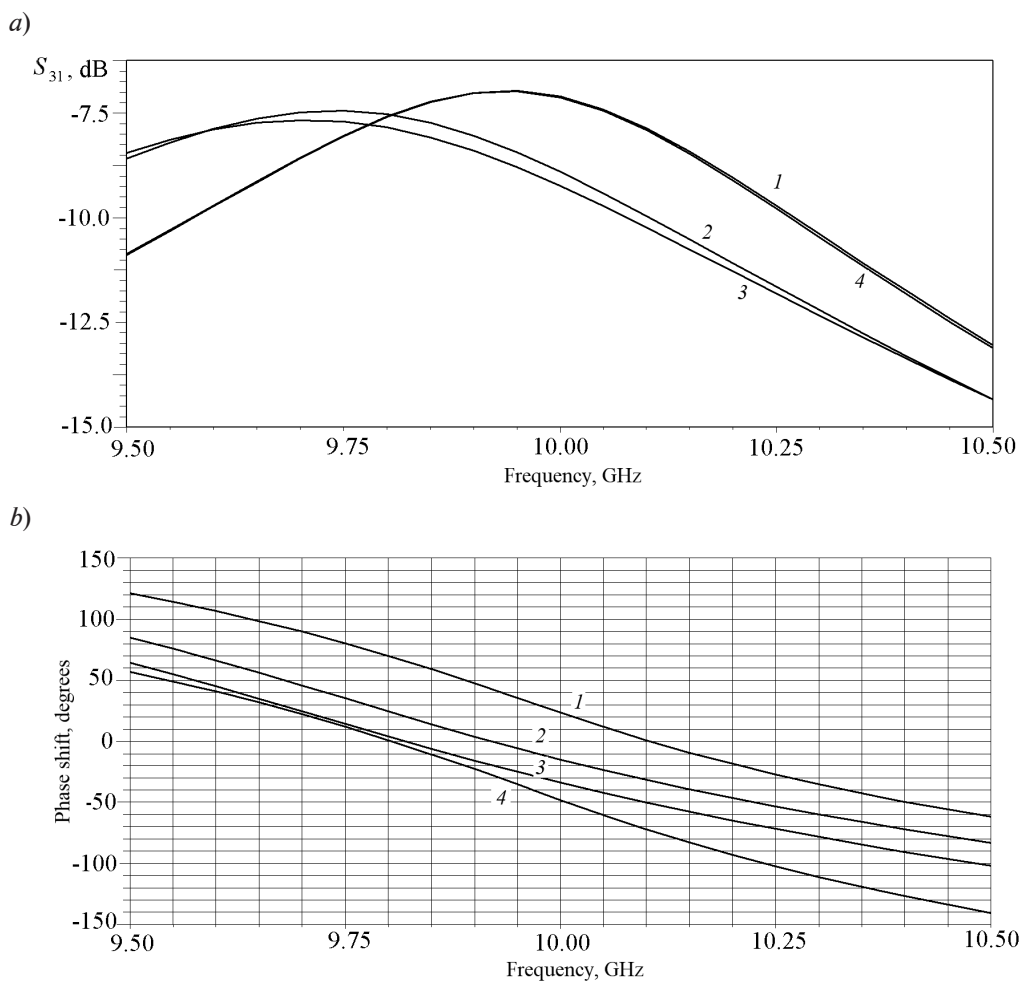


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента ответвления  $S_{31}$  (*a*) и фазового сдвига относительно входного терминала  $\arg(S_{31})$  (*b*) для разных смещений центра щели по оси  $x$  относительно начала координат:  $-4$  мм (кривая 1);  $0$  мм (2);  $+2$  мм (3);  $+4$  мм (4)

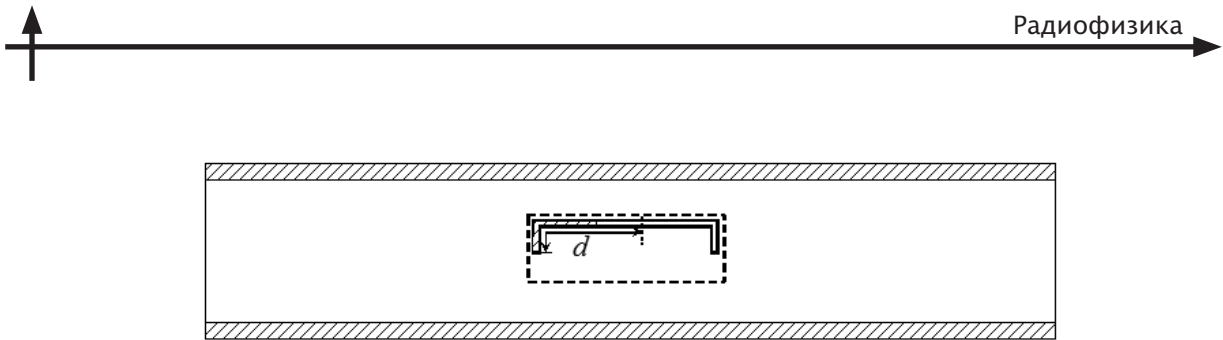


Рис. 3. Эскиз предлагаемой формы излучающей щели исследуемого фазовращателя (неизлучающая часть щели заштрихована)

ента ответвления  $S_{31}$  из основного тракта к излучателю для разных положений щели. Значения  $S_{31}$  обычно лежат в пределах  $-(10-20)$  дБ. Эта величина определяется числом элементов антенны с последовательным питанием, а также формой желаемого амплитудного распределения. Коэффициент ответвления  $S_{31}$  можно изменять путем смещения щели по отношению к осевой линии волновода, а также путем его расстройки относительно резонанса. Как видно из графиков, резонансная частота немного возрастает при смещении центра щели относительно симметричного положения.

На рис. 2, *b* приведены частотные зависимости фазового сдвига электрического поля (относительно входного терминала) для тех же положений щели. Видно, что максимальный фазовый сдвиг на частоте 9,50 ГГц составляет  $62^\circ$ .

Чтобы увеличить фазовый сдвиг, предлагается использовать Г-образную щель

вблизи краев окна, связывающего волновода. На рис. 3 представлен эскиз щели исследуемого фазовращателя. Излучающие Г-образные щели формируются включением или выключением *p-i-n*-диодов в П-образной щели. Нами были промоделированы различные положения щели, включающие ее два крайних положения.

На рис. 4 представлен результат моделирования электрической компоненты поля, которая формируется на протяжении щели. Видно, что распределение амплитуды электрического поля на Г-образной щели остается близким к синусоидальному, как и на прямой щели.

На рис. 5, *a* приведены зависимости фазового сдвига двух Г-образных щелей от частоты электромагнитного излучения. Видно, что максимальный фазовый сдвиг составляет  $177^\circ$ , что достаточно для создания полноценного фазовращателя для сканирующей ФАР (с учетом  $180^\circ$ -градусного сдвига щели, симметричной относительно

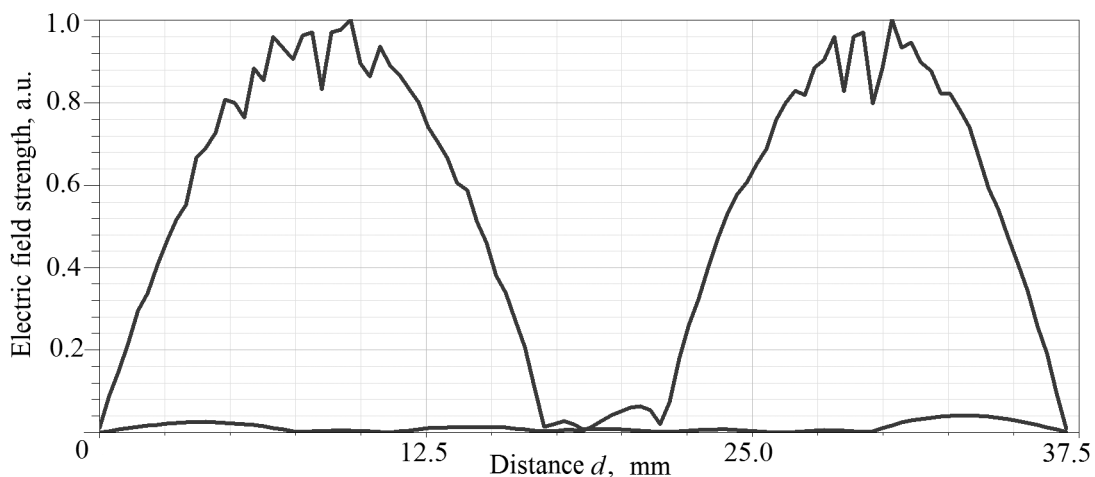


Рис. 4. Распределение электрического поля по Г-образной щели для двух состояний *p-i-n*-диодов (расстояние  $d$  показано на рис. 3)

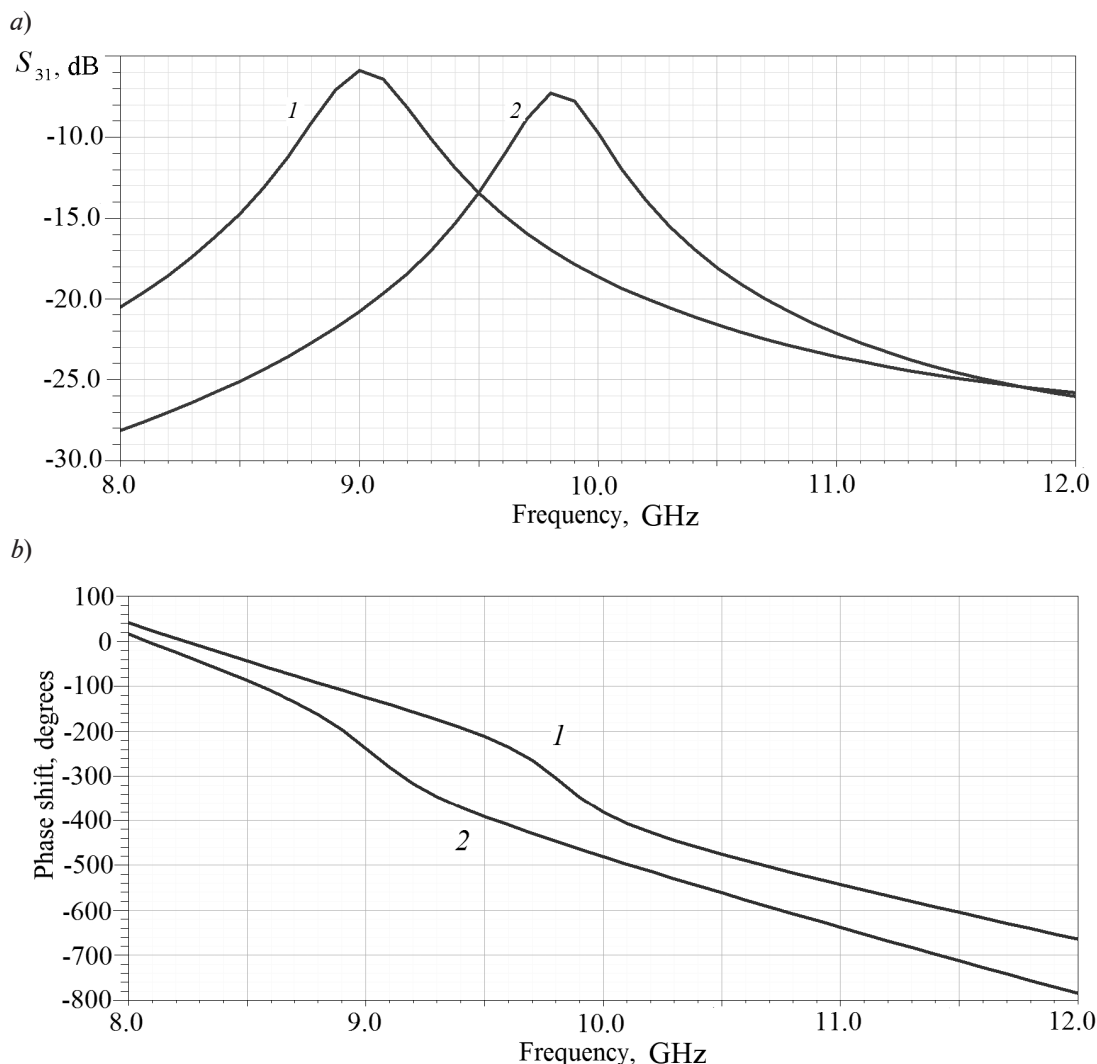


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента передачи (а) и фазового сдвига (б) двух Г-образных щелей для их крайнего левого (кривая 1) и крайнего правого (кривая 2) положений

оси волновода, максимальный фазовый сдвиг получается равным около  $360^\circ$ ).

При этом коэффициент передачи  $S_{31}$  для двух вариантов щели (рис. 5, б) в рабочем диапазоне для двух положений щели отличается менее, чем на 10 дБ.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проверки результатов моделирования были изготовлены два макета фазовращателей и два комплекта щелей. Чтобы прорезать щель в первом комплекте, применяли технологию лазерной резки, а во втором – метод фрезеровки.

На рис. 6 приведены экспериментальные зависимости сдвига фаз от положения щели для макета № 1. Данные, представленные на графике рис. 6, б, – это результаты измерений для щелей, которые расположены по другую сторону от осевой линии волновода (нижний ряд), по сравнению со щелями на рис. 6, а (верхний ряд). Это дает дополнительный сдвиг фаз в  $180^\circ$ . В представленных на рисунке результатах это учтено (произведено вычитание  $180^\circ$  из данных на рис. 6, б). Поэтому, согласно теоретическим представлениям, кривые на рис. 6, б должны совпадать с кривыми на рис. 6, а. По различиям этих графиков

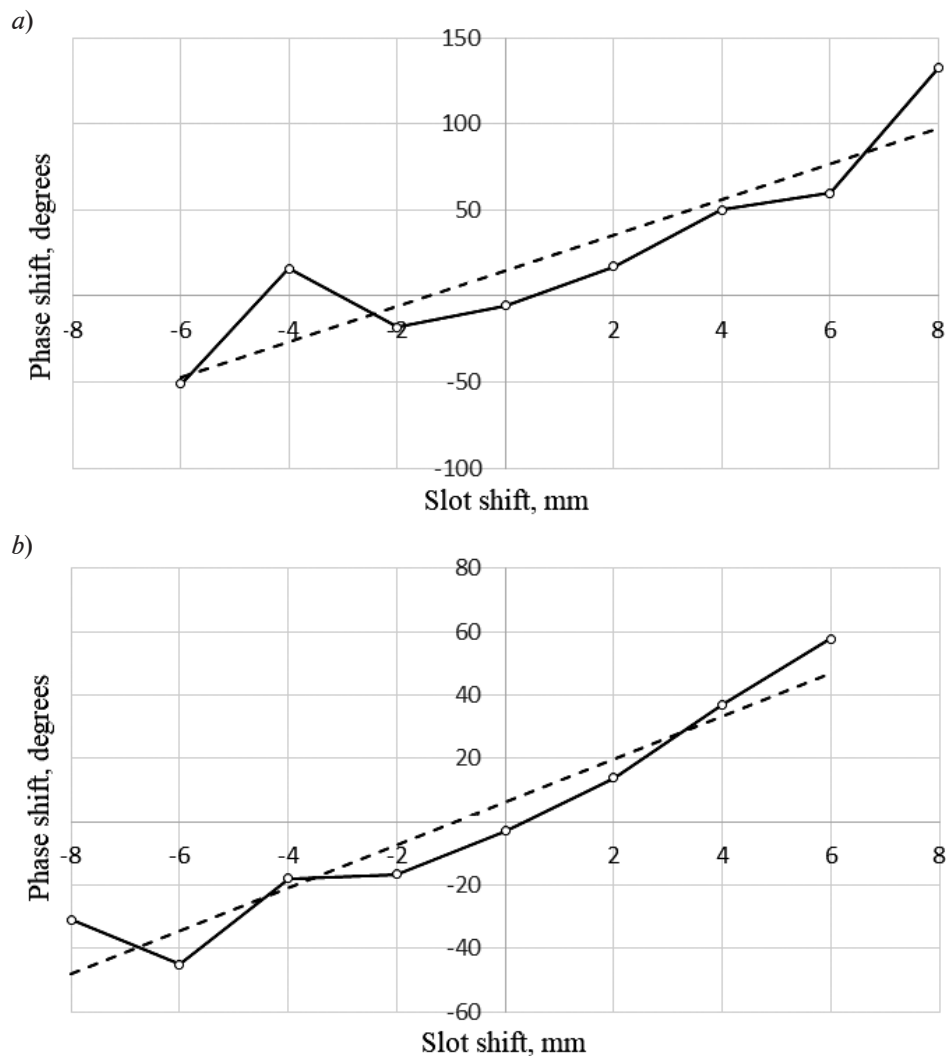


Рис. 6. Экспериментальные зависимости сдвига фазы от положения Г-образной щели в верхнем (а) и нижнем (б) рядах (см. пояснения в тексте) для экспериментального макета № 1 (см. рис. 7, а), а также линейные аппроксимации данных (пунктирные прямые). Частота СВЧ-излучения – 10 ГГц

можно судить о погрешности проведенных измерений, а также о погрешности позиционирования диафрагмы.

Фотографии обоих макетов приведены на рис. 7. Результаты измерений для макета № 2 оказались близкими к таковым для макета № 1, что доказало пригодность технологий как лазерной резки, так и фрезерования для прорезания Г-образных щелей.

### Заключение

Исследованы специфические свойства волноводно-щелевого фазовращателя, ко-

торый предлагается использовать в качестве управляемого ответвителя в распределительных устройствах фазированных антенных решеток с последовательным питанием и управлением  $p-i-n$ -диодами. Рассмотрены характеристики волны, прошедшей через волновод, и их зависимости от положения и размеров щели, прорезанной в широкой стенке волновода. Для проверки результатов моделирования изготовлены экспериментальные модели фазовращателя, которые снабжены Г-образными щелями. Проведены соответствующие измерения

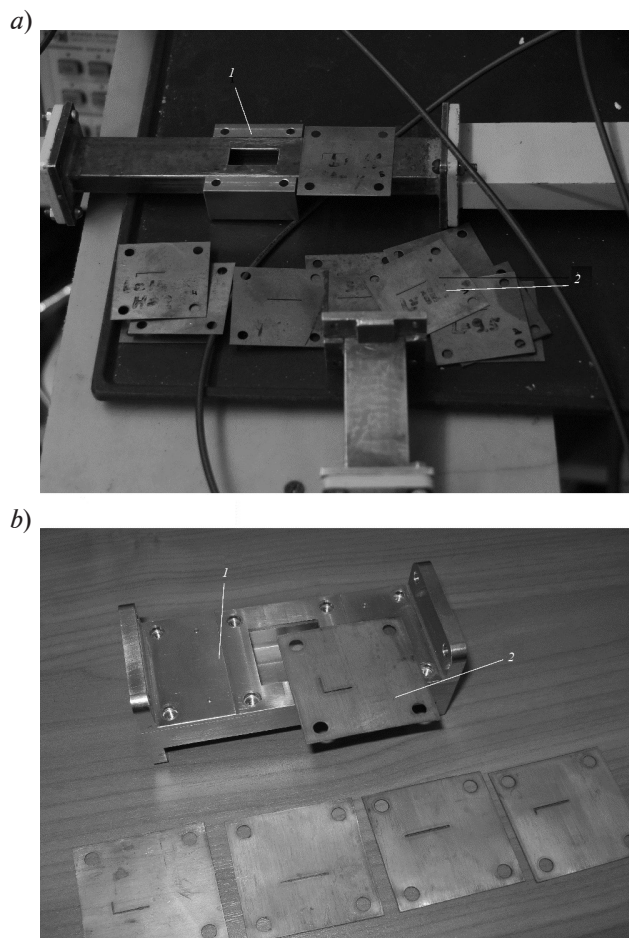


Рис. 7. Фотографии макетов № 1 (а) и № 2 (б) фазовращателей (1) и Г-образных щелей (2), которые крепятся на фазовращатели

характеристик для двух типов макетов.

Полученные экспериментальные данные в целом подтвердили результаты моделирования. Таким образом доказана прин-

ципальная возможность использования волноводно-щелевого фазовращателя в качестве элемента распределительного устройства ФАР с последовательным питанием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Г.А., Богомаз Н.А. Невзаимные фазовые сдвиги и коэффициент затухания в волноводе с ферритовой пластиной // Радиотехника и электроника. 1958. Т. 3. № 9. С. 1133 – 1343.
2. Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1960. 408 с.
3. Зайцев Э.Ф., Черепанов А.С., Гуськов А.Б. Новые электрически сканирующие антенны миллиметрового диапазона волн // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2003. № 4. С. 3–12.
4. Черепанов А.С., Гузенко К.В., Крутов И.А. Щелевая интегральная фазированная антенная решетка // Научно-технические ведомости

- СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. № 2 (145). С. 41–45.
5. Зайцев Э.Ф., Черепанов А.С., Гуськов А.Б. Новые антенны миллиметрового диапазона волн с электрическим сканированием // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2001. № 2 (24). С. 47–52.
6. Воскресенский Д.И., Грановская Р.А., Давыдова Н.С. и др. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток. М.: Радио и связь, 1981. 432 с.
7. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. Под ред. Л.Д. Бахраха. М.: Сайнс-пресс,



2002. 232 с.

8. **Вендик О.Г., Парнес М.Д.** Фазовращатели сканирующих антенн для радаров обзора территорий // Беспроводные технологии. 2006. № 2. С. 26–28.

9. **Vendik O., Vasiliev A., Parnes M.** Low cost ferroelectric phase shifter for a higher microwave power level // IEEE COMCAS 2009. The

International IEEE Conference on Microwaves, Communication, Antennas and Electronic Systems. Tel-Aviv, Israel. 2009.

10. **Безуглов А.А., Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Шацкий В.В.** Эволюционный метод многокритериального фазового синтеза линейной антенной решетки // Радиотехника. 2017. № 6. С. 251–260.

*Статья поступила в редакцию 19.01.2018, принята к публикации 13.02.2018.*

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ДИКИЙ Дмитрий Валерьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
diwil@mail.ru

**АКИМОВ Валерий Петрович** – доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
valeri\_akimov@mail.ru

**СОЧАВА Александр Андреевич** – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
sochava@mail.ru

**ЧЕРЕПАНОВ Андрей Сергеевич** – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
ASCherSPb@mail.ru

#### REFERENCES

[1] **G.A. Gurevich, N.A. Bogomaz**, Nonreciprocal phase shifts and a decay factor in the phase-loaded waveguide, J. Commun., Techn. & Electron. 3 (9) (1958) 1133–1343.

[2] **A.G. Gurevich**, Ferrity na sverkhvysokikh chastotakh [Microwave ferrite devices], Fizmatgiz, Moscow, 1960.

[3] **E.F. Zaytsev, A.S. Cherepanov, A.B. Guskov**, New electrically scanning antennas of millimeter wave range, Radioelectronics and Communication Systems. 46 (4) (2003) 3–12.

[4] **A.S. Cherepanov, K.V. Guzenko, I.A. Kroutov**, The slot integrated phased array, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science, Telecommunications and Control Systems. No. 2 (145) (2012) 41–45.

[5] **E.F. Zaytsev, A.S. Cherepanov, A.B. Guskov**, New millimeter-wave electrically scanned antennas, St. Petersburg State Polytechnical University

Journal. (2) (2001) 47–52.

[6] **D.I. Voskresenskiy, R.A. Granovskaya, N.S. Davydova, et al.**, Antennы i ustroystva SVCh. Proyektirovaniye fazirovannykh antenykh reshetok [Antennas and microwave devices. Designing the phased arrays], Radio i svyaz, Moscow, 1981.

[7] **O.G. Vendik, M.D. Parnes**, Antennы s elektricheskim skanirovaniem. Vvedeniye v teoriyu. Pod red. L.D. Bakhrakha [Electrically scanned antennas, An introduction to the theory, Ed. by L.D. Bakhrakh], Science-Press, Moscow, 2002.

[8] **O.G. Vendik, M.D. Parnes**, Fazovrashchateli skaniruyushchikh antenн dlya radarov obzora territoriy [Phase shifters of scanning antennas for territory-looking radars], Wireless Technologies (Рус.). (2) (2006) 26–28.

[9] **O. Vendik, A. Vasiliev, M. Parnes**, Low cost ferroelectric phase shifter for a higher microwave power level, IEEE COMCAS 2009, The International



IEEE Conference on Microwaves, Communication, Antennas and Electronic Systems, Tel-Aviv, Israel (2009).

[10] A.A. Bezuglov, A.V. Litvinov, S.E.

Mishchenko, V.V. Shatskiy, The evolutionary method of multi-criteria phase synthesis of linear array antenna, Radioengineering. (6) (2017) 251–260.

*Received 16.01.2018, accepted 30.01.2018.*

#### THE AUTHORS

**DIKIY Dmitriy V.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

diwil@mail.ru

**AKIMOV Valeriy P.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

valeri\_akimov@mail.ru

**SOCHAVA Alexander A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

sochava@mail.ru

**CHEREPANOV Andrey S.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

ASCherSPb@mail.ru